

Painel 11 - Calibração de medidores de vazão em campo: práticas e desafios

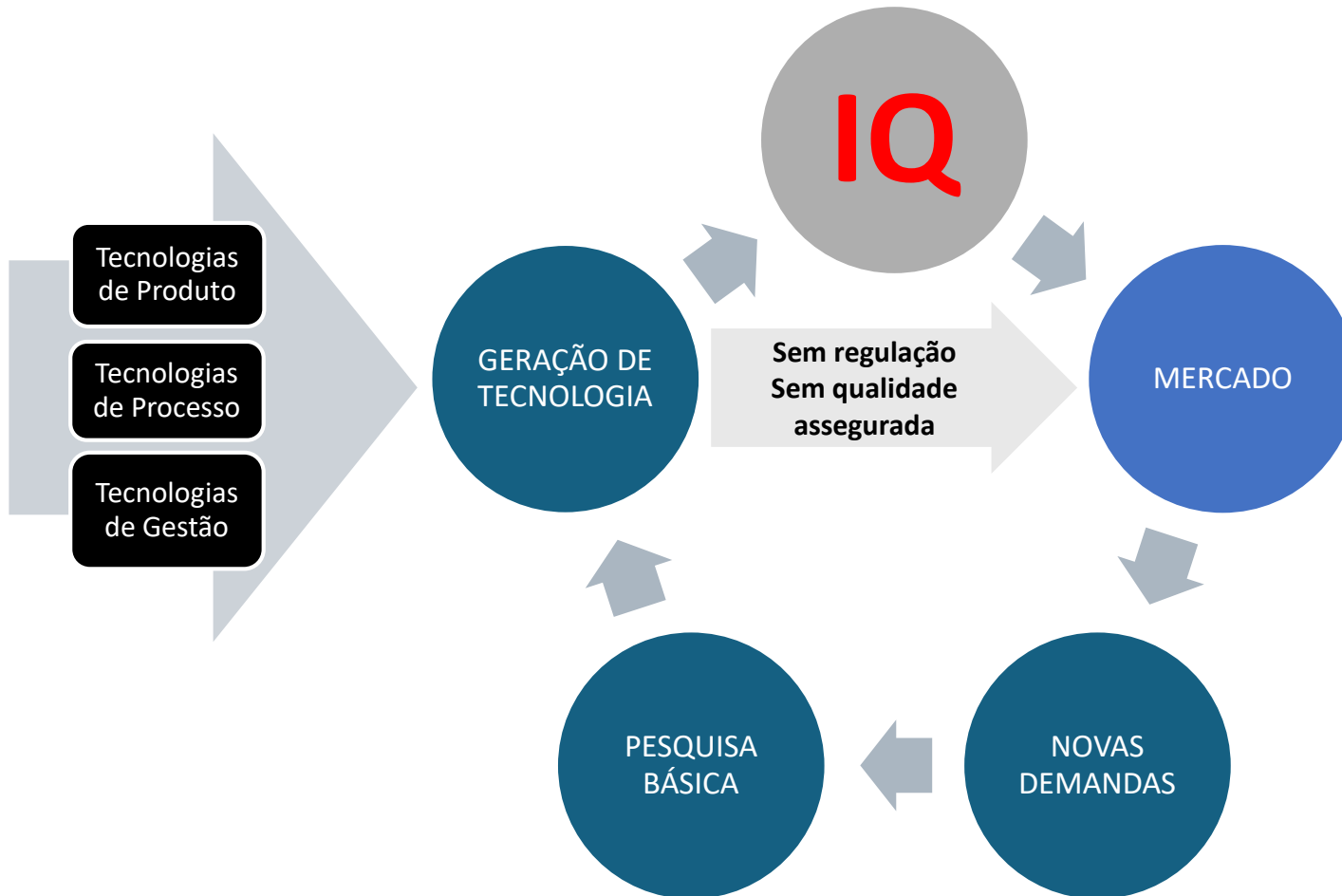
Desafios da Metrologia Avançada para a calibração de medidores de vazão

Nilson Massami Taira

Unidade Tecnologias Regulatórias e Metrológicas / IPT

Curitiba – PR 28.08.2025

CICLO DE INOVAÇÃO - INFRAESTRUTURA DA QUALIDADE (IQ)

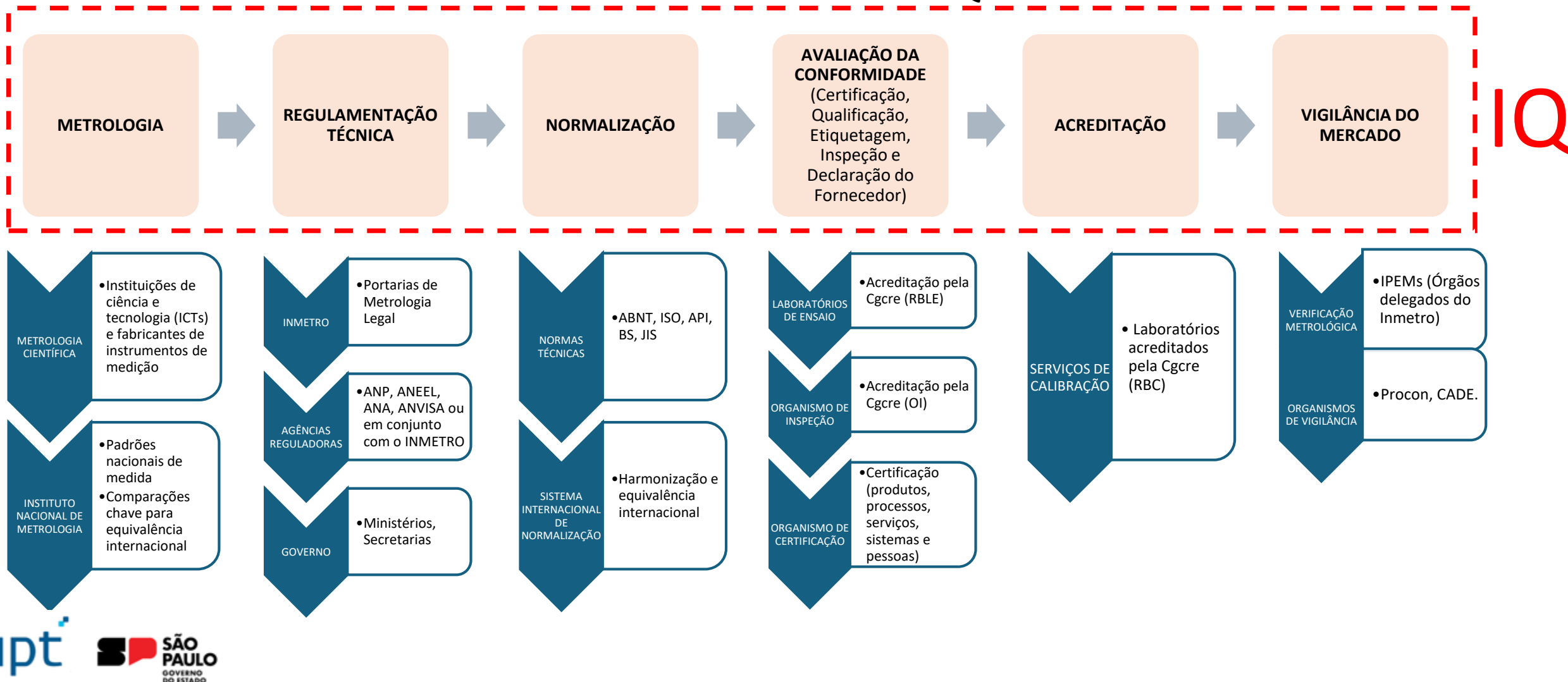


Monetização da IQ

Um relatório do *Bureau International des Poids et Mesures* – BIPM, apresenta uma estimativa de 3% a 6% do PIB nos países industrializados correspondem à medição e suas operações relacionadas.

Segundo a OCDE, 80 % do comércio global (24 trilhões de dólares em 2023) envolve testes e medições que confirmam a conformidade com regulamentos e normas.

INFRAESTRUTURA DA QUALIDADE



TIPOS DE METROLOGIA E A INOVAÇÃO

Metrologia Legal (verificação)

Medidores de água, energia e gás, combustíveis, produtos pré medidos, balanças, termômetros, etilômetro, esfigmomanômetro, ...

Metrologia Industrial

A metrologia industrial ou aplicada tem como objetivo apoiar as atividades de controle de processos e de produtos, assegurando a sua qualidade metrológica e também a gestão dos meios de medição que utiliza.

Metrologia Científica

Metrologia Científica é uma ferramenta fundamental no crescimento e inovação tecnológica, promovendo a competitividade e criando um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país.

Grau de segurança
jurídica

Demanda de
transformação
digital

Grau de
inovação

Grau de normalização e regulação

Metrologia Avançada



2018

PDIP Chamada FAPESP



Metrologia do Futuro: Oito Perspectivas Estratégicas

01

Metrologia da Informação e do Produto Final com Qualidade Percebida

Vai além da medição tradicional de grandezas físicas. Amplia a metrologia tradicional ao quantificar aspectos da experiência do usuário, como conforto, usabilidade e confiança percebida. Integra medições físicas com análise de dados e avaliações subjetivas, essenciais em produtos e serviços onde a percepção do valor é tão importante quanto a conformidade técnica.

02

Metrologia da Imagem

Envolve a avaliação quantitativa de elementos visuais, como imagens médicas, satélites, inspeção óptica industrial e sensoriamento remoto. Integra técnicas de *visão computacional*, *fotometria*, *radiometria* e algoritmos de análise automatizada com rastreabilidade metrológica.

03

Metrologia do Serviço com Qualidade Suficiente e Ótimo Custo-Benefício

Prioriza a incerteza adequada ao uso, evitando excessos desnecessários de precisão. Essa abordagem valoriza o equilíbrio entre qualidade entregue e custo, sendo essencial para avaliação e regulação de serviços públicos e privados com foco na eficiência e na percepção do usuário.

04

Metrologia do Byte

Trata da rastreabilidade e integridade de dados digitais: tempo de latência, perdas em transmissão, compressão, criptografia e verificação de integridade. É crítica na era da *IoT*, *blockchain*, metaverso e aplicações em nuvem com garantia de qualidade digital.

05

Metrologia Multivariada em Vários Domínios

Requer sistemas de medição capazes de operar simultaneamente em domínios distintos (tempo, frequência, espaço, clima, vibração etc.). Exemplo: sensores inteligentes que correlacionam pressão, vazão e composição química em tempo real.

06

Metrologia Analítica de Variáveis Simultâneas em Tempo Real

Envolve a captura, análise e decisão em ambientes altamente dinâmicos (como redes elétricas inteligentes, processos industriais autônomos ou veículos autônomos). Demanda metrologia com alta resolução temporal, tratamento de dados em fluxo contínuo (*streaming analytics*), e sistemas embarcados com confiabilidade metrológica.

07

Metrologia do Software

Avalia o desempenho, confiabilidade, rastreabilidade e reprodutibilidade de algoritmos e sistemas computacionais, incluindo tanto softwares determinísticos (como sistemas embarcados) quanto não determinísticos (como IA e aprendizado de máquina). Exige novos referenciais para testar, validar e calibrar comportamentos digitais.

08

Metrologia não Apenas da Medição com Precisão, mas da Decisão Baseada na Medição

A metrologia deixa de ser fim em si mesma e passa a ser uma **metrologia para decisão**, capaz de sustentar políticas públicas, certificações de sustentabilidade, modelos econômicos baseados em dados e ações industriais em ambiente de incerteza.

Metrologia Avançada em Tempos de Dados e Algoritmos

Vivemos uma era em que a medição ultrapassa o físico. A inteligência artificial, o big data e o aprendizado por máquinas desafiam os limites da metrologia tradicional ao quantificar aspectos antes considerados subjetivos — emoções, decisões, comportamentos.

“Graças ao big data, à inteligência artificial e ao aprendizado por máquinas, pela primeira vez na história começa a ser possível conhecer uma pessoa melhor do que ela mesma, hackear seres humanos...”
— Yuval Noah Harari, 2018



Nesse novo cenário, a **metrologia deixa de ser apenas instrumento de controle técnico** e passa a ser **instrumento estratégico de compreensão e ação sobre sistemas complexos** — sejam eles sociais, computacionais ou híbridos.

Projeto IPT - ANA

Inspeção e calibração de sistemas
de macromedição de água bruta

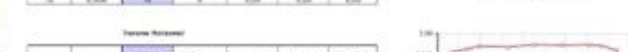


Planilha para determinação da vazão por mapeamento planimétrico -
referência: ISO 3858:2008

Elaborado por: Fernando R. Nogueira
Data: 10/05/2024

Local de medição: Rio São Carlos 7 e 8
Tipo de medição: Método ventral no rio
Método de medição: Método ventral no rio

posição (m)	distância corrida (m)	distância de sobre elevação (m)	velocidade corrida (m/s)	velocidade corrida (m/s)
0	0	0	0,00	0,00
1	0,001	0,001	0,00	0,00
2	0,002	0,002	0,00	0,00
3	0,003	0,003	0,00	0,00
4	0,004	0,004	0,00	0,00
5	0,005	0,005	0,00	0,00
6	0,006	0,006	0,00	0,00
7	0,007	0,007	0,00	0,00
8	0,008	0,008	0,00	0,00
9	0,009	0,009	0,00	0,00
10	0,010	0,010	0,00	0,00
11	0,011	0,011	0,00	0,00
12	0,012	0,012	0,00	0,00



posição (m)	distância corrida (m)	distância de sobre elevação (m)	velocidade corrida (m/s)	velocidade corrida (m/s)
0	0	0	0,00	0,00
1	0,001	0,001	0,00	0,00
2	0,002	0,002	0,00	0,00
3	0,003	0,003	0,00	0,00
4	0,004	0,004	0,00	0,00
5	0,005	0,005	0,00	0,00
6	0,006	0,006	0,00	0,00
7	0,007	0,007	0,00	0,00
8	0,008	0,008	0,00	0,00
9	0,009	0,009	0,00	0,00
10	0,010	0,010	0,00	0,00
11	0,011	0,011	0,00	0,00
12	0,012	0,012	0,00	0,00

Vazão medida (m³/s)	Vazão calculada (m³/s)
0,00	0,00

posição (m)	distância corrida (m)	distância de sobre elevação (m)	velocidade corrida (m/s)	velocidade corrida (m/s)
0	0	0	0,00	0,00
1	0,001	0,001	0,00	0,00
2	0,002	0,002	0,00	0,00
3	0,003	0,003	0,00	0,00
4	0,004	0,004	0,00	0,00
5	0,005	0,005	0,00	0,00
6	0,006	0,006	0,00	0,00
7	0,007	0,007	0,00	0,00
8	0,008	0,008	0,00	0,00
9	0,009	0,009	0,00	0,00
10	0,010	0,010	0,00	0,00
11	0,011	0,011	0,00	0,00
12	0,012	0,012	0,00	0,00

posição (m)	distância corrida (m)	distância de sobre elevação (m)	velocidade corrida (m/s)	velocidade corrida (m/s)
0	0	0	0,00	0,00
1	0,001	0,001	0,00	0,00
2	0,002	0,002	0,00	0,00
3	0,003	0,003	0,00	0,00
4	0,004	0,004	0,00	0,00
5	0,005	0,005	0,00	0,00
6	0,006	0,006	0,00	0,00
7	0,007	0,007	0,00	0,00
8	0,008	0,008	0,00	0,00
9	0,009	0,009	0,00	0,00
10	0,010	0,010	0,00	0,00
11	0,011	0,011	0,00	0,00
12	0,012	0,012	0,00	0,00

posição (m)	distância corrida (m)	distância de sobre elevação (m)	velocidade corrida (m/s)	velocidade corrida (m/s)
0	0	0	0,00	0,00
1	0,001	0,001	0,00	0,00
2	0,002	0,002	0,00	0,00
3	0,003	0,003	0,00	0,00
4	0,004	0,004	0,00	0,00
5	0,005	0,005	0,00	0,00
6	0,006	0,006	0,00	0,00
7	0,007	0,007	0,00	0,00
8	0,008	0,008	0,00	0,00
9	0,009	0,009	0,00	0,00
10	0,010	0,010	0,00	0,00
11	0,011	0,011	0,00	0,00
12	0,012	0,012	0,00	0,00

Projeto IPT - ANA

Elaboração de manuais, guias e documentos orientativos



Cursos de capacitação para profissionais do setor



ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Superintendência de Fiscalização – SF e
Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica – SGH

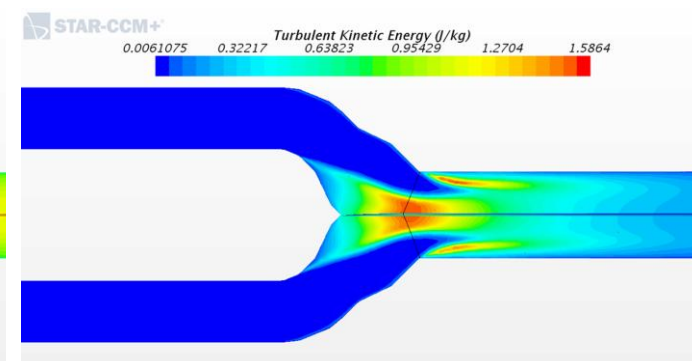
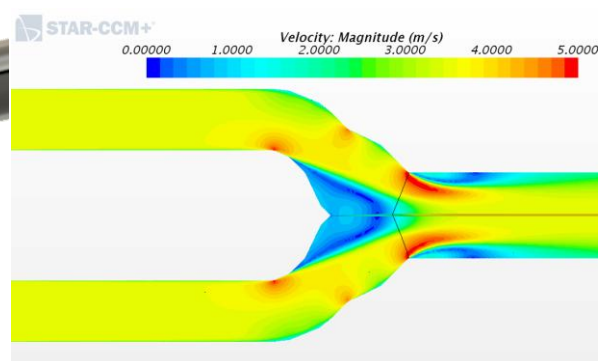
Projeto IPT – ANA Estudo para Utilização de CFD

Objetivo: Redução de incertezas associadas à assimetria do perfil de velocidades de cada seção da tubulação.

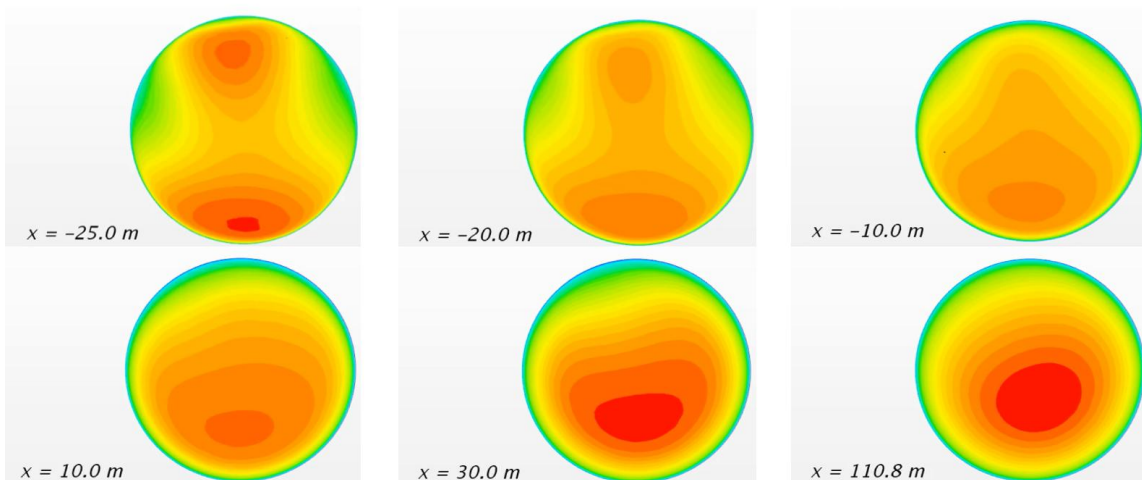
tubulação de 2,4 metros de diâmetro e 150 metros de comprimento



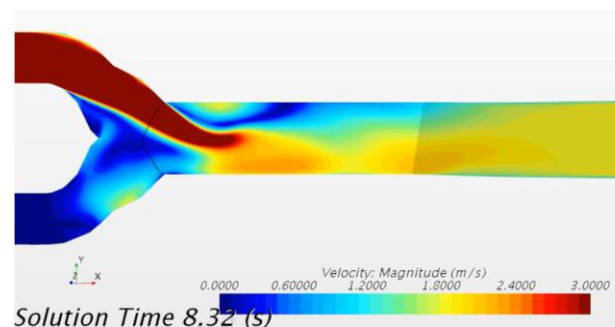
Modelagem da geometria



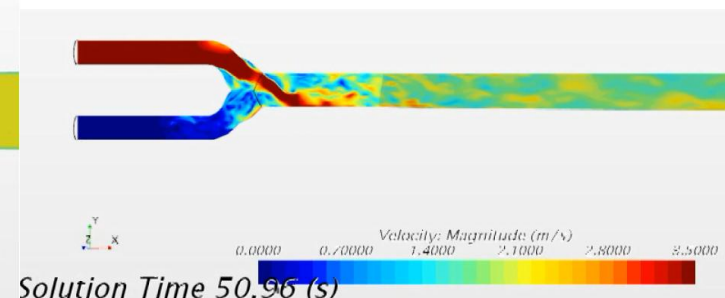
Campo de velocidades e energia cinética de turbulência



Linhas de isovelocidades ao longo da tubulação

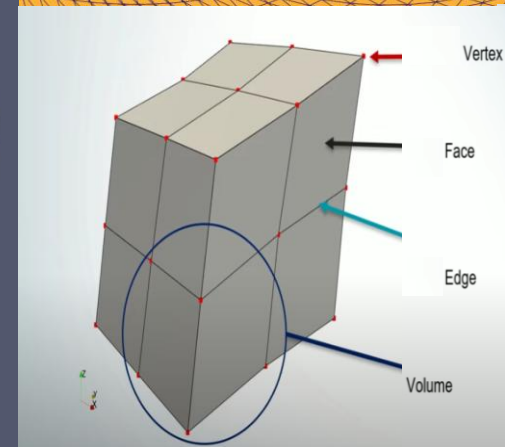
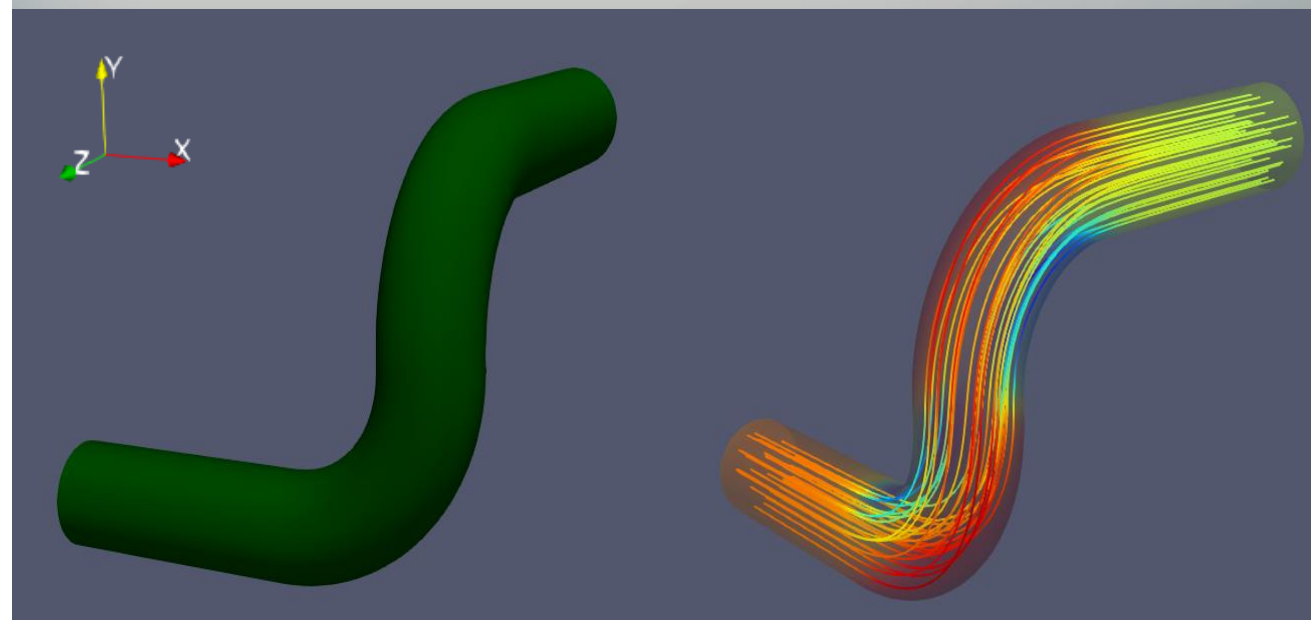


Transitório - 1 Bomba Acionada - Modelo de Turbulência – RANS e LES



What is Computational Fluid Dynamics?

Colors for Directors
Or
Colorful Fake Dynamics



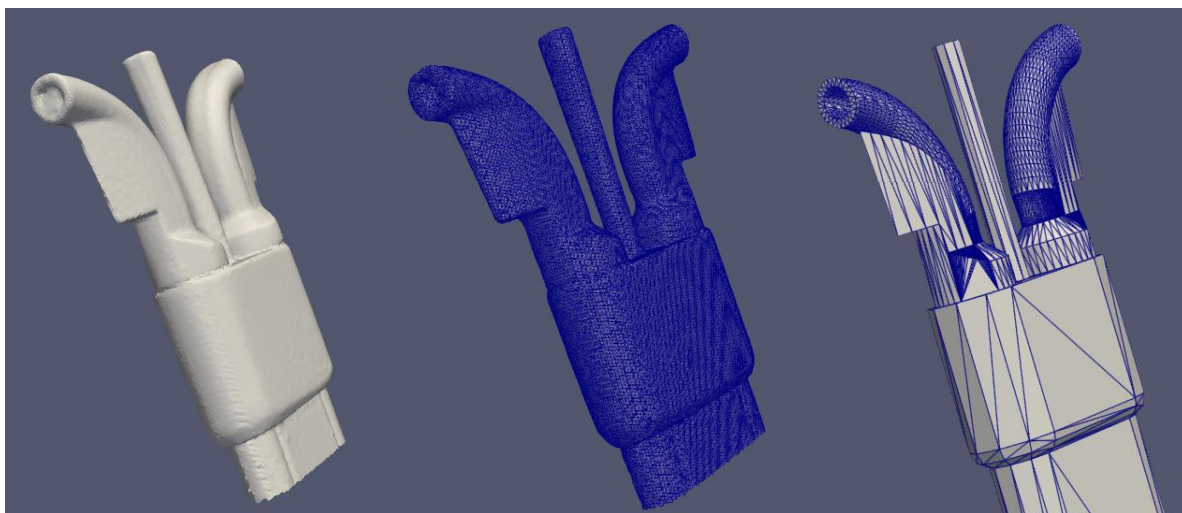
The Navier-Stokes Equations

MASS	ACCELERATION	FORCE
$\rho \cdot$	$\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right)$	$= \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{v}$
Density of the Fluid	Change in Velocity over Time Speed and Direction of Fluid	External Forces such as Gravity Pressure Gradient Internal Stress Forces (viscous effects)

Newton's 2nd Law of Motion

Calibração Numérica do tubo Pitot Cole

Modelagem de geometria de Pitot Cole



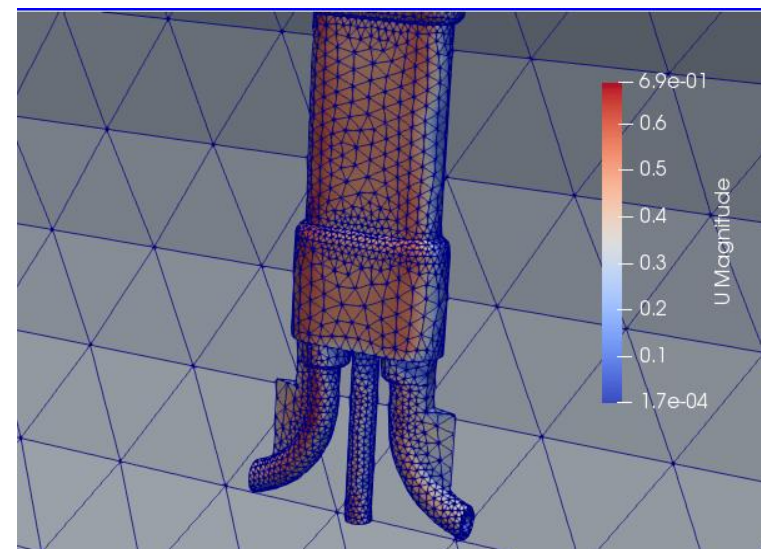
a) Imagem obtida por scanner

b) grid do scanner

c) imagem refinada

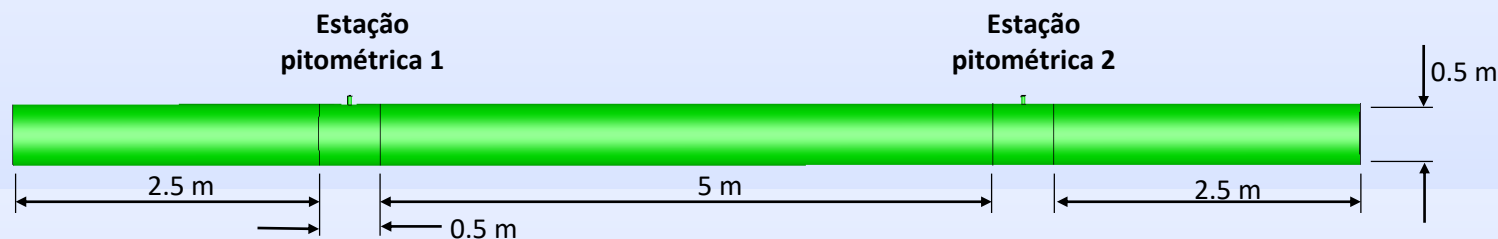


“Calibração” do Pitot Cole por CFD



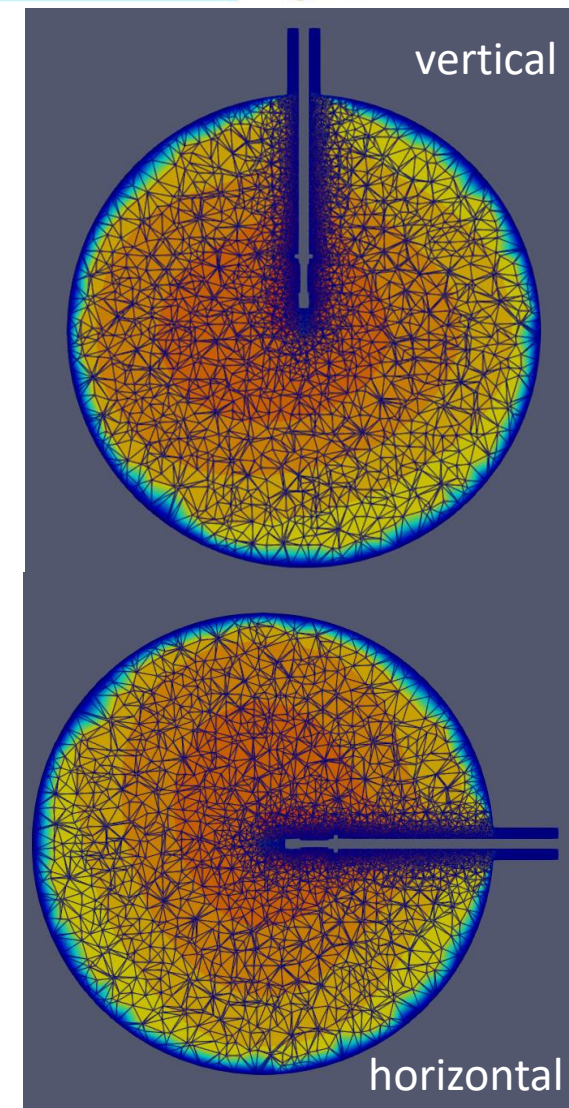
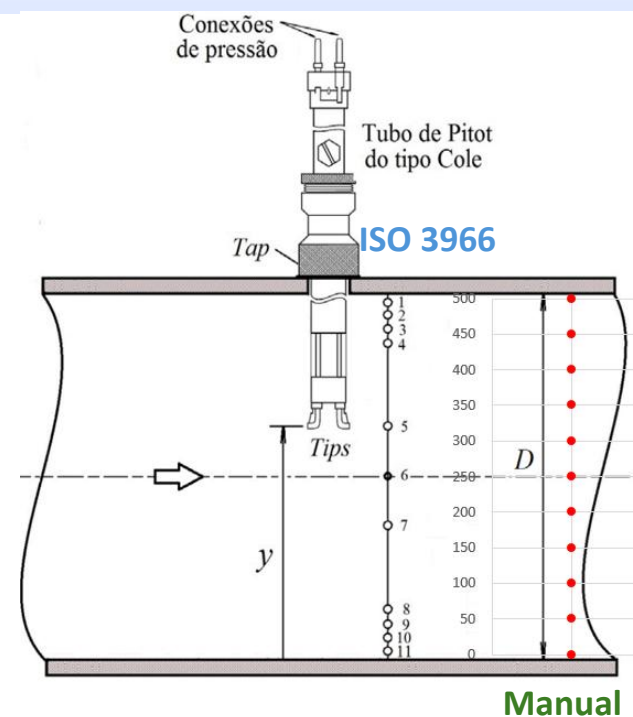
vel	Re/L	Cd experimental	Cd CFD	desvio
0.5	5.00E+05	0.884	0.875	-1.0%
1	1.00E+06	0.875	0.876	0.1%
2	2.00E+06	0.866	0.867	0.1%
3	3.00E+06	0.861	0.887	3.1%
4	4.00E+06	0.857	0.894	4.3%

Gêmeo Digital de Pitometria

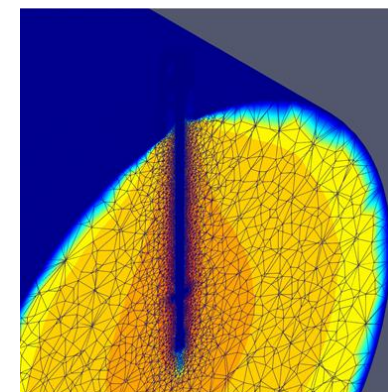
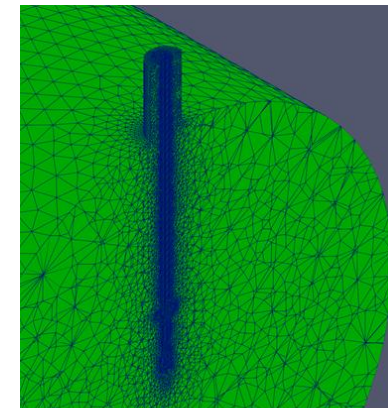
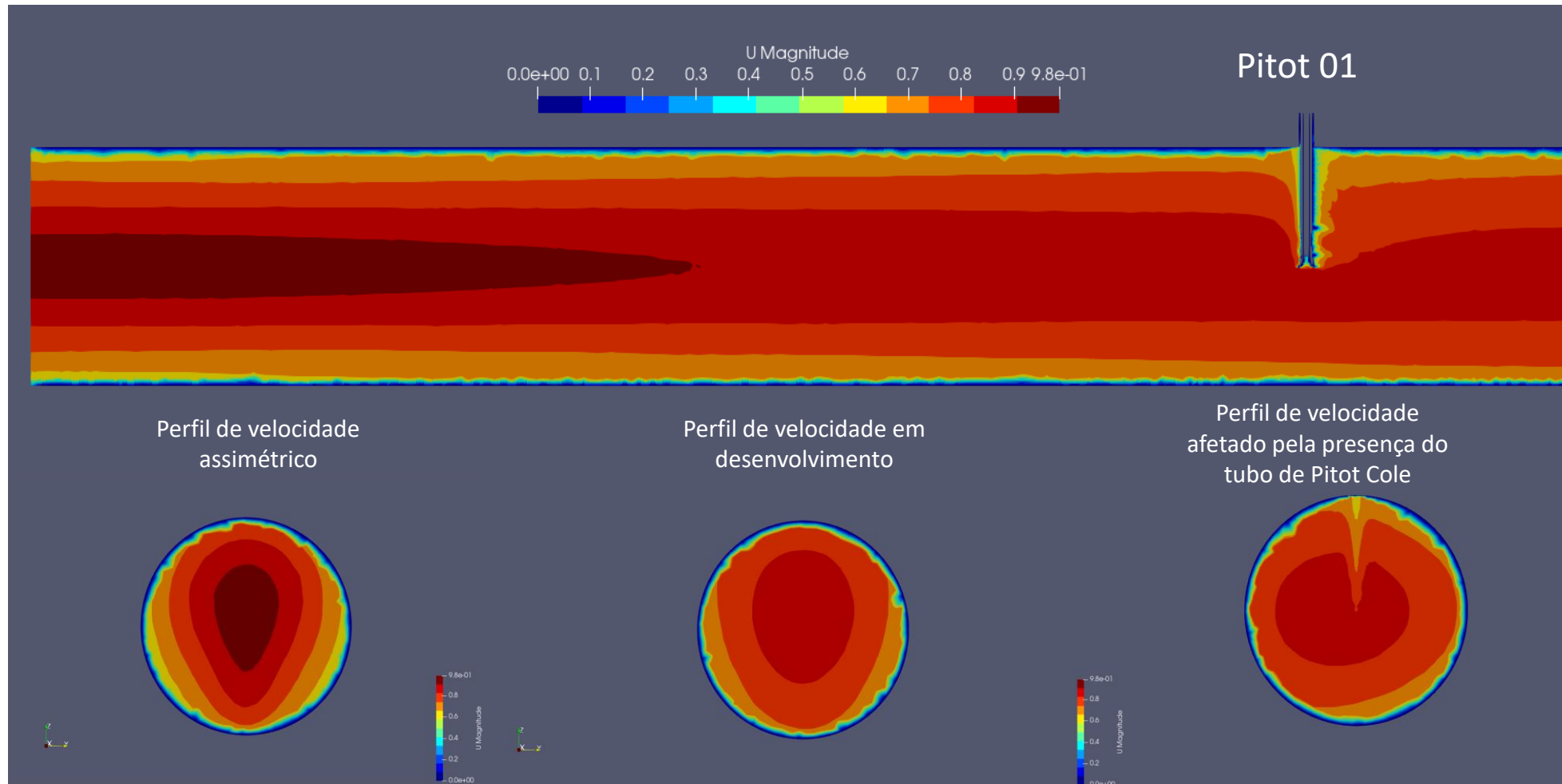


Características da solução numérica

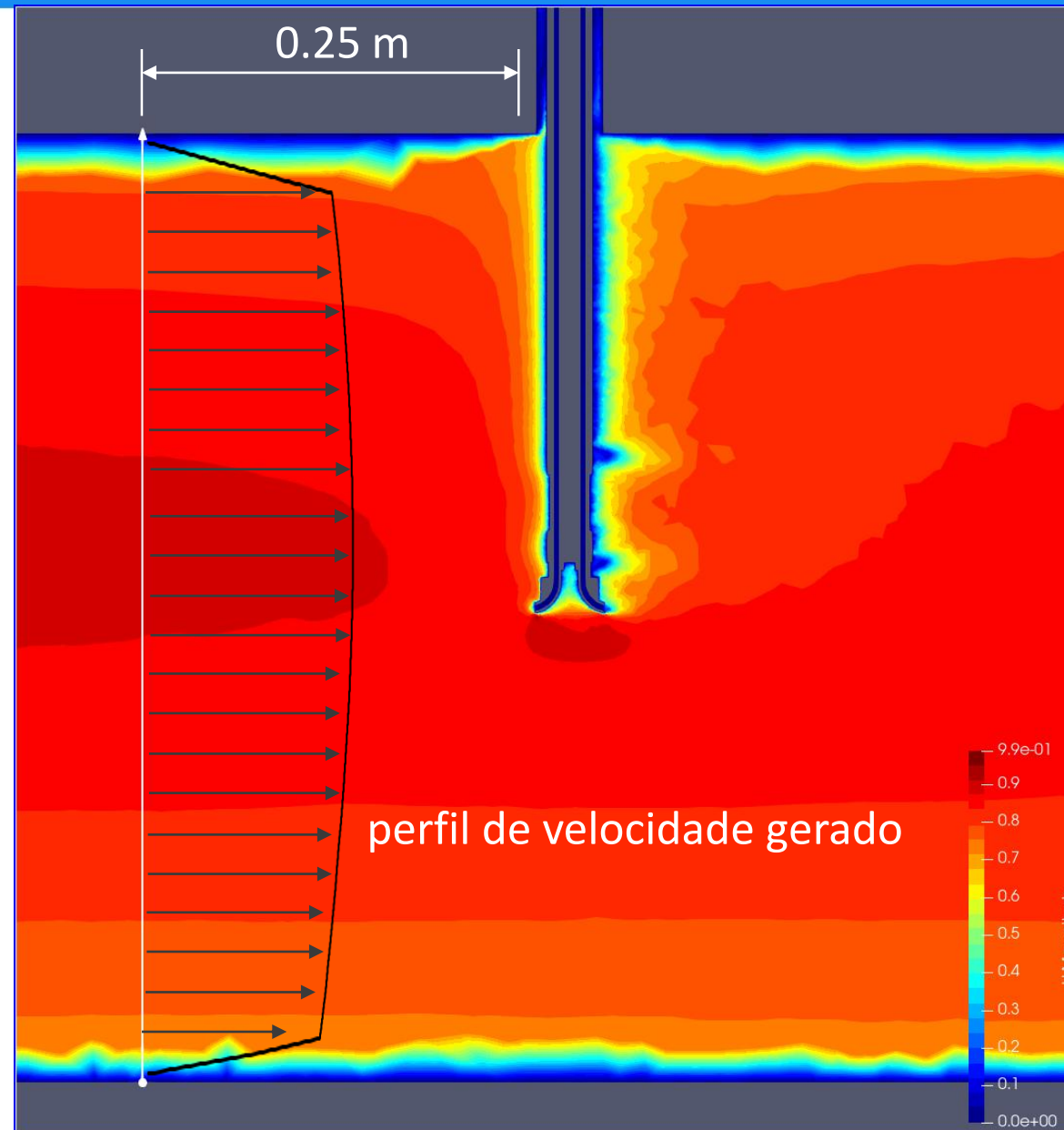
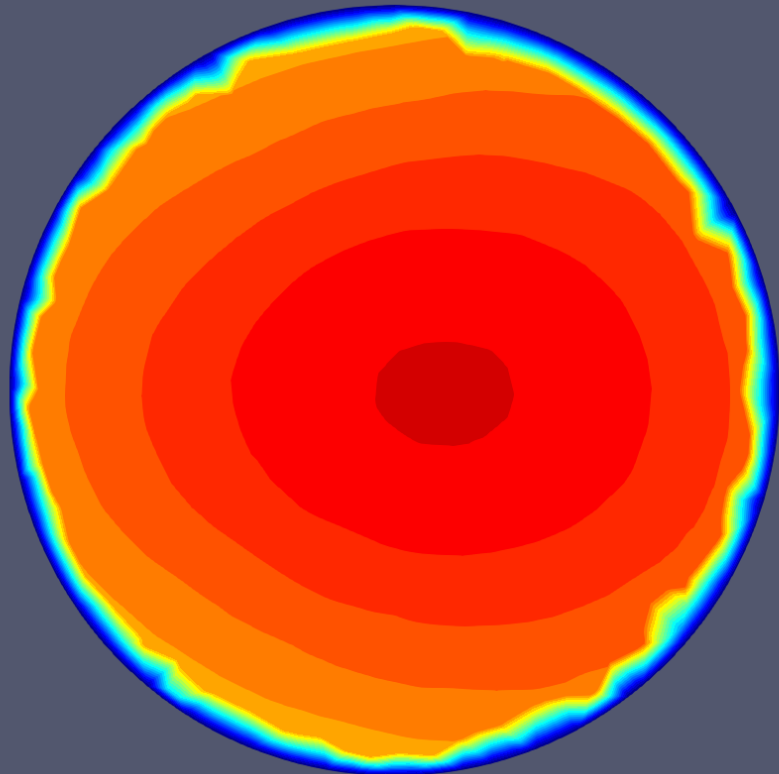
- Geometria 3D de 11 posições conforme metodologia clássica (**Manual**) e logLinear (**ISO 3966**)
- Traverses Vertical e Horizontal
- Malha de simulação: 1.5 a 3.5 milhões de elementos
- Modelo turbulência k- Ω SST (*steady flow*)
- Refinamento da solução 20 mil iterações
- Workstation 24 núcleos
- Tempo de simulação: 4 a 13 horas (total ~ >200 horas)



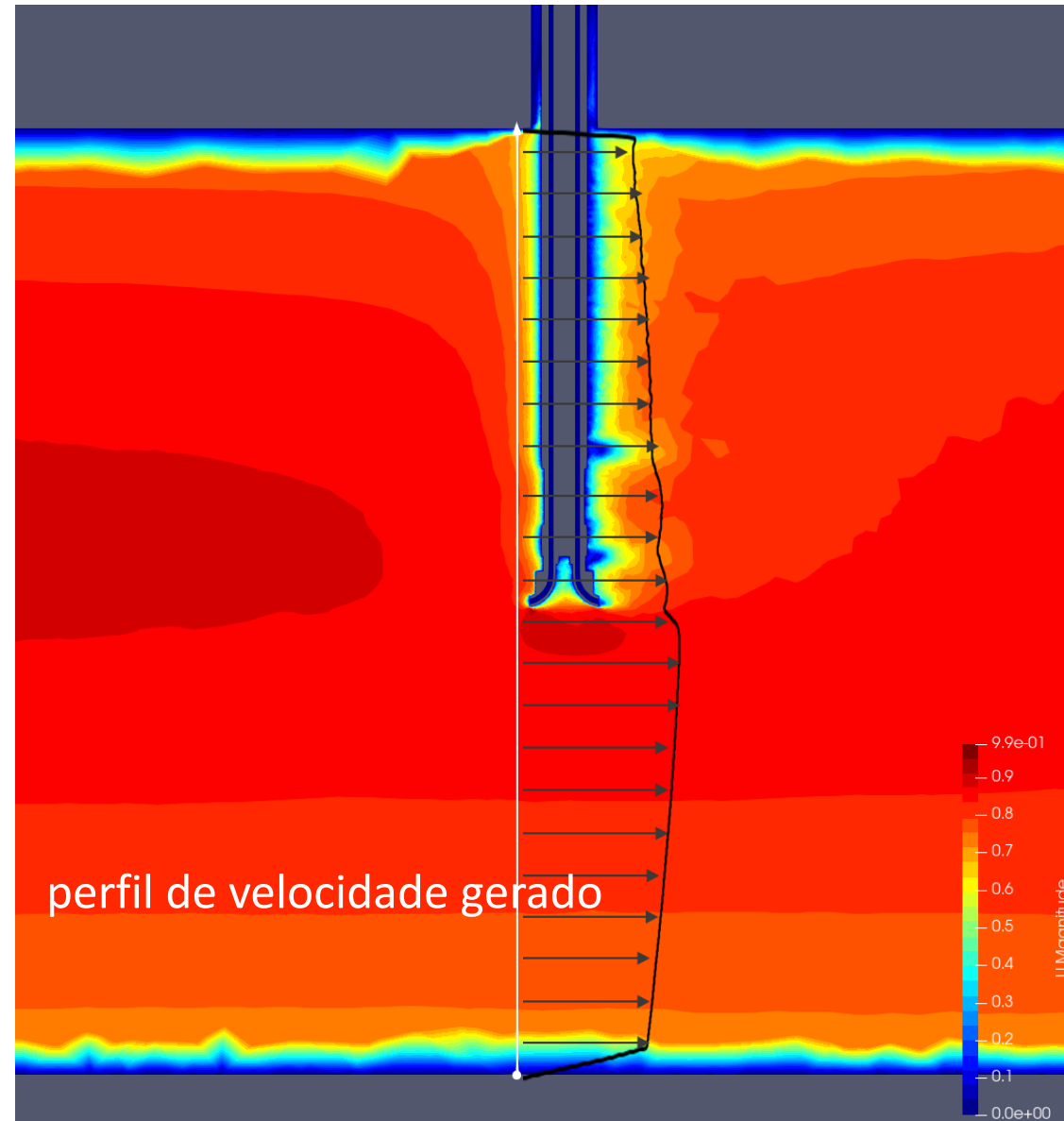
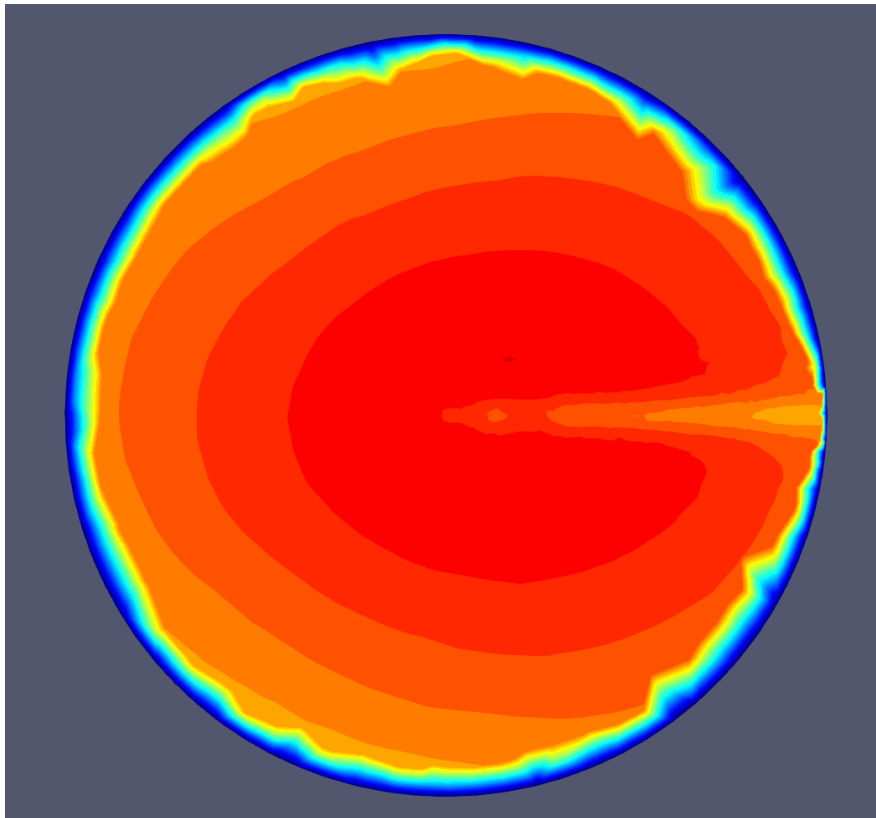
Gêmeo Digital de Pitometria



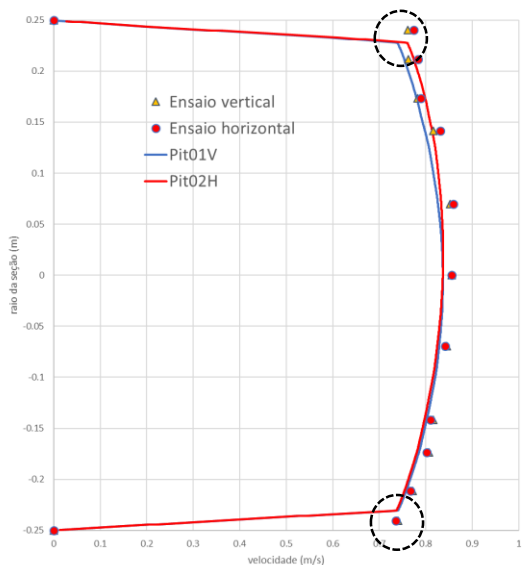
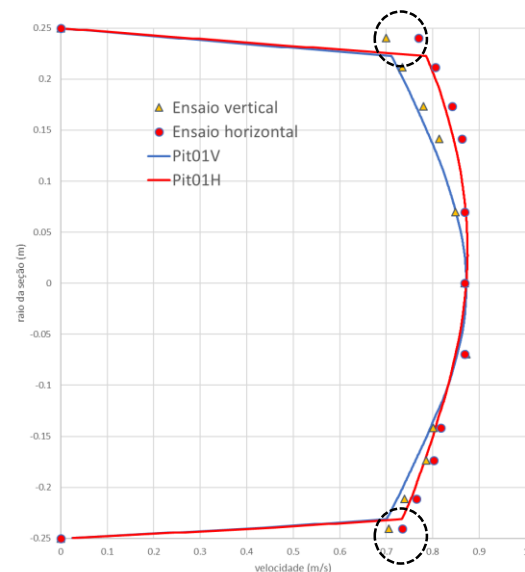
Linhas de isovelocidades “ao longe”



Linhas de isovelocidades próximas Pitot



Gêmeo Digital de Pitometria - Resultado



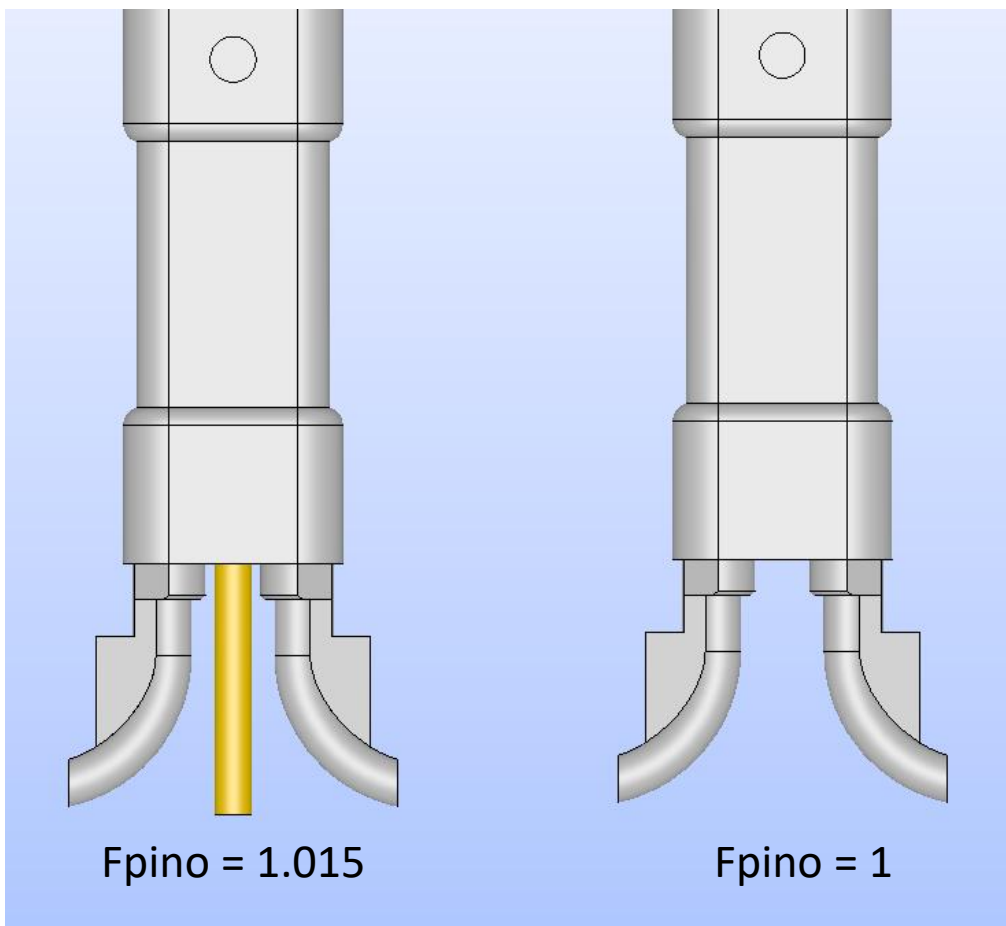
pitot01				
Caso	Vazão Simulação (L/s)	Vazão calculada (L/s)	desvio (%)	Incerteza (%)
ISO vertical	154.0	152.6	0.92	1.8
ISO horizontal		159.6	-3.5	1.8
ISO vert + horiz		156.1	-1.3	3.1
Manual vertical	154.0	156.0	-1.3	ND
Manual horizontal		162.0	-4.9	ND

pitot02				
Caso	Vazão Simulação (L/s)	Vazão calculada (L/s)	desvio (%)	Incerteza (%)
ISO vertical	154.0	156.1	-1.3	1.8
ISO horizontal		156.9	-1.8	1.8
ISO vert + horiz		156.5	-1.6	1.9
Manual vertical	154.0	157.1	-2.0	ND
Manual horizontal		158.2	-2.7	ND

Perfis de velocidades para condição de Pitot na posição central

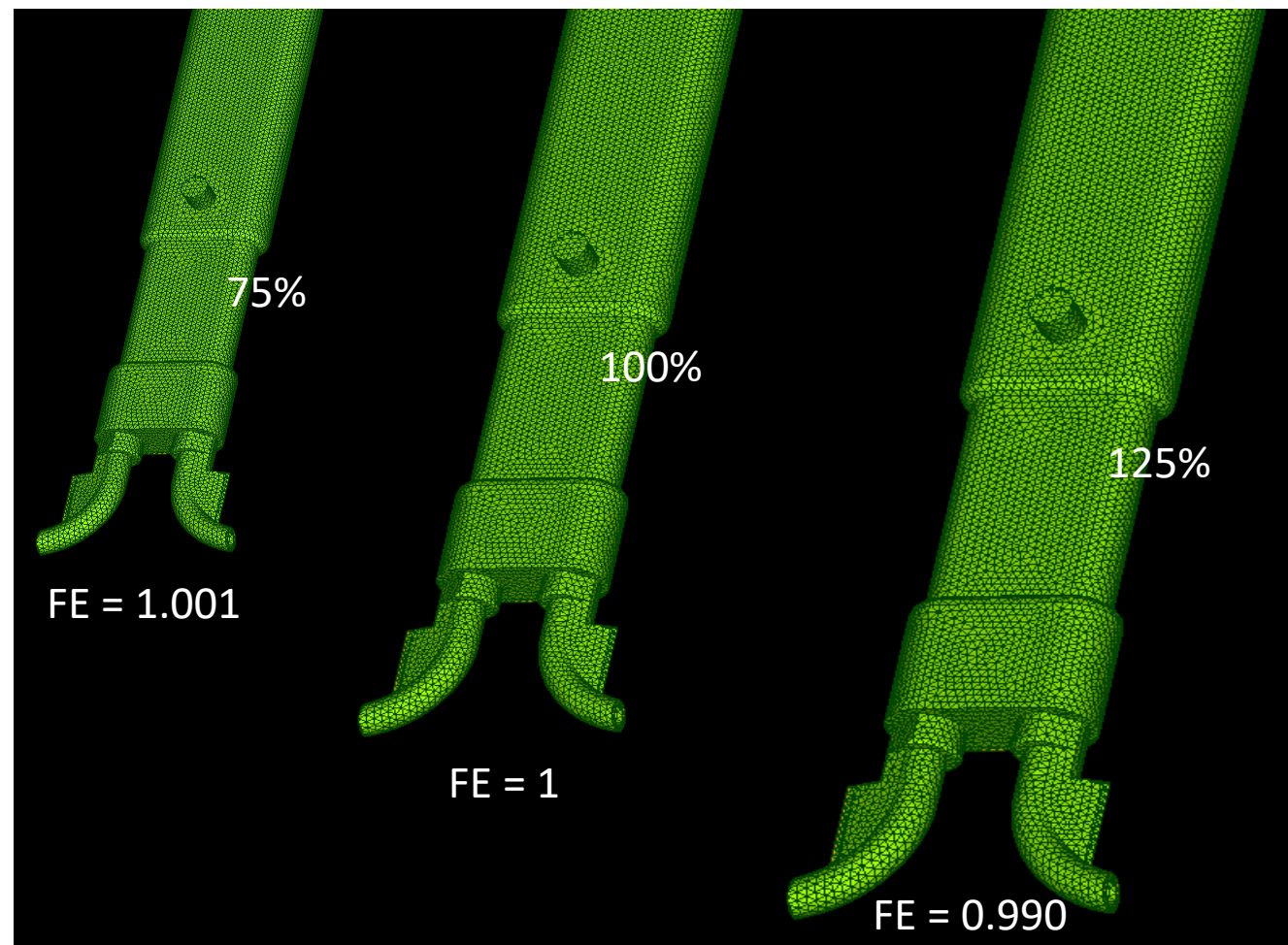
○ Camada Limite precisa ser melhorada

Pino → proteção do tip



Validado experimentalmente

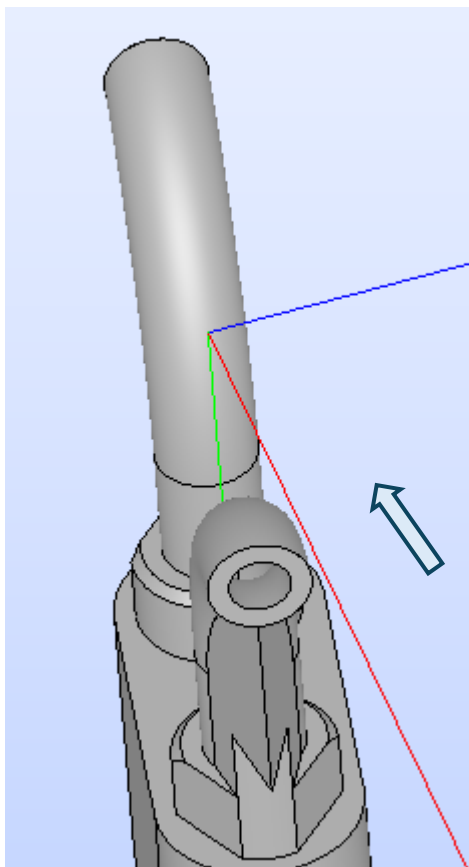
FE → Fator de escala das dimensões do Pitot Cole



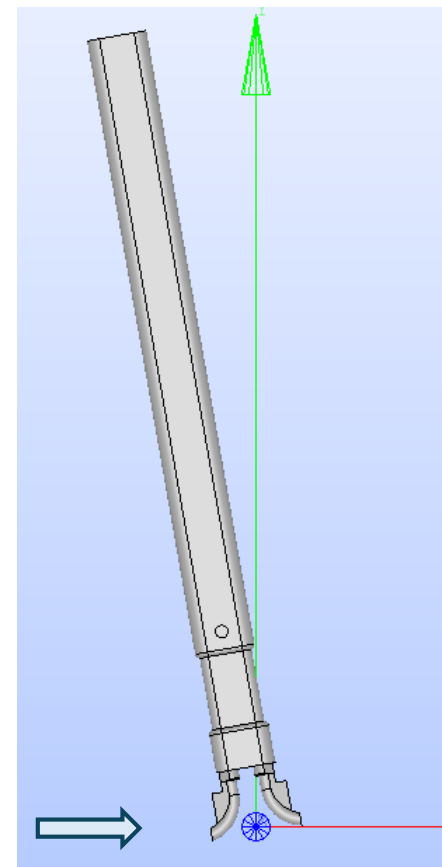
Não validado experimentalmente

FY → Efeito da rotação 10° (*yaw*) do tip

FY = 0.962



Validado experimentalmente

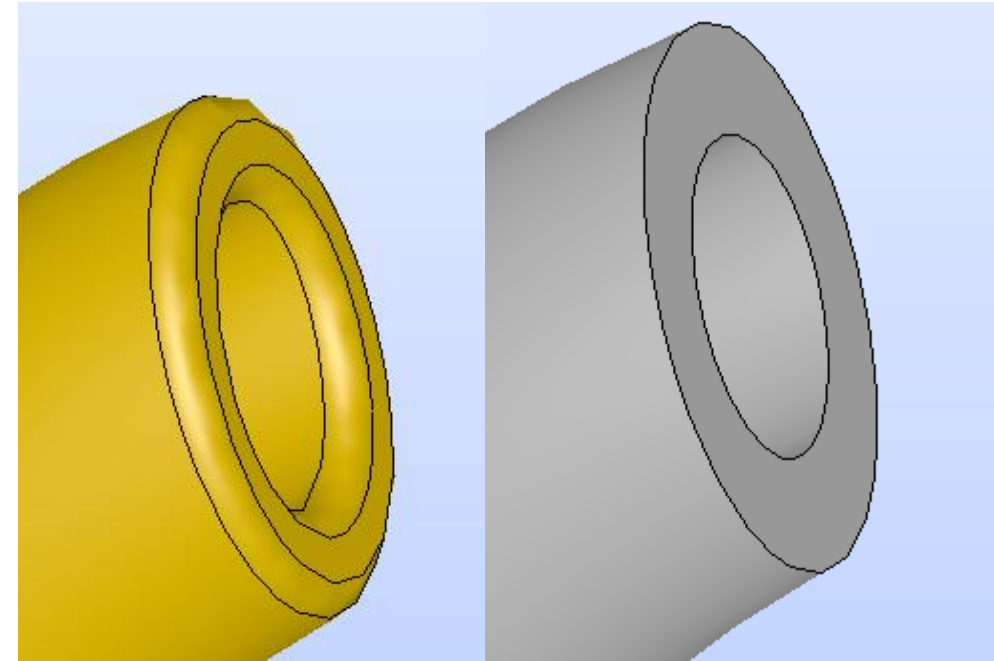
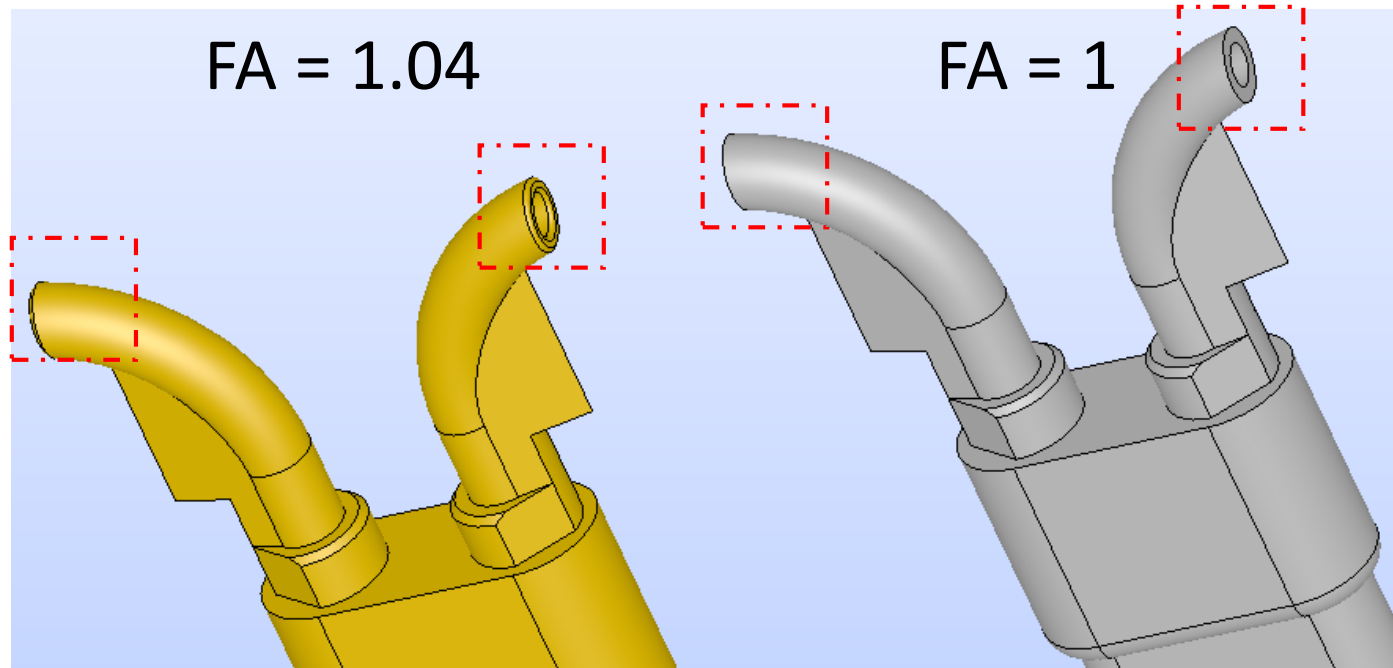


FR = 1.027

FR → Efeito da inclinação 10° (*roll*) do tip

Validado experimentalmente

FA → Efeito arredondamento do bordo do tip



Não validado experimentalmente

METODOLOGIA DE CÁLCULO DA VAZÃO SEGUNDO O MANUAL DE PITOMETRIA

$$FV_{\text{médio}} = \frac{\frac{\sum \sqrt{h_i}}{n}}{\sqrt{h_c}}$$

$$Q = V_c \cdot K_{ep} \cdot C_d$$

Constante pitométrica

$$K_{ep} = C_d \cdot C_{proj} \cdot S_{corrigida} \cdot FV_{\text{médio}}$$

$$K_{ep}^* = C_d \cdot C_{proj} \cdot S_{corrigida} \cdot FV_{\text{médio}} \cdot F_{pino} \cdot FE \cdot FY \cdot FR \cdot FA$$

Pino central

Fator de escala do Pitot

Fator de rotação do tip

Fator de inclinação do Pitot

Fator de arredondamento dos tips